

Министерство сельского хозяйства российской федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
Высшего образования
Волгоградский государственный аграрный университет

Кафедра «Электроснабжение сельского хозяйства и ТОЭ»

А.В. Каргов

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Расчет токов короткого замыкания в электроэнергетических
системах

Учебно-методическое пособие

Волгоград 2014

УДК 621.311

Переходные процессы в электроэнергетических системах. Расчет токов короткого замыкания в электроэнергетических системах: учебно-методическое пособие для студентов специальности 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» / Сост. А.В. Каргов. Волгоградский ГАУ. – Волгоград, 2014, 34с

В методическом пособии приводится задание на расчетно-графическую работу по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах» для студентов специальности 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Рассмотрены теоретические вопросы, связанные с расчетом токов короткого замыкания в электроэнергетических системах. Изложены указания и советы по выполнению расчетно-графической работы. Приведен пример расчета.

Одобрено и рекомендовано к печати кафедрой «Электроснабжение сельского хозяйства и ТООЭ» и методической комиссией электроэнергетического факультета Волгоградского ГАУ.

1. Расчет токов короткого замыкания.

Общие понятия.

1.1 Задачей расчетно-графической работы является определение значений токов трехфазного, двухфазного и однофазного короткого замыкания в расчетной точке электрической сети (расчетная точка определяется вариантом задания), а также определение максимального значения тока короткого замыкания $i_{y\delta}$ и его действующего значения $I_{y\delta}$.

Расчет предполагается вести в относительных базисных величинах по средне номинальным значениям напряжений, т.е. вместо номинальных значений напряжений 10; 35; 110; 220 кВ принимать соответственно значения 10,5; 37; 115; 230 кВ. при расчете предполагается пренебречь активными составляющими сопротивлений (ввиду их малости) и учитывать только реактивные составляющие сопротивлений.

В качестве базисных величин можно рекомендовать базисную мощность $S_b = 100 \text{ MVA}$, а в качестве базисного напряжения – среднее номинальное напряжение в расчетной точке к.з. При расчете используется метод симметричных составляющих, согласно которому любую несимметричную систему трёх векторов можно разложить на три симметричные: прямой, обратной и нулевой последовательности.

1.2. Расчет токов трехфазного короткого замыкания.

Этот симметричное короткое замыкание, поэтому оно описывается параметрами прямой последовательности.

Составляется схема замещения. Сопротивления схемы замещения для определения токов трехфазного короткого замыкания определяются так (расчет ведем в относительных базисных величинах).

Сопротивление системы:

$$X_{*\bar{S}_c} = X_c \cdot \frac{S_{\bar{S}}}{U_{ср.н.}^2} \quad (1)$$

где, $X_{*\bar{S}_c}$ - относительное базисное сопротивление системы;

X_c – сопротивление системы в (Ом);

$S_{\bar{S}}$ – базисная мощность(можно принять $S_{\bar{S}} = 100 \text{ МВА}$)

$U_{ср.н.}$ – средне номинальное напряжение (т.к. в задании даны значения сопротивлений систем, приведенные к $U_{ср.н.} = 115 \text{ кВ}$ эту величину и принимаем при расчете).

Сопротивления ЛЭП:

$$X_{*\bar{S}_{ЛЭП}} = X_{о_{ЛЭП}} \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{S}}}{U_{ср.н.}^2} \quad (2)$$

где $X_{*\bar{S}_{ЛЭП}}$ - относительное базисное сопротивление ЛЭП;

$X_{о_{ЛЭП}}$ - удельное реактивное сопротивление ЛЭП (можно принять

$$X_{о_{ЛЭП}} = 0,4 \text{ Ом/км})$$

l - длина линии в (км)

$U_{ср.н.}^2$ - средне номинальное напряжение линии в (кВ)

Сопротивление двухобмоточных трансформаторов (активными сопротивлениями трансформаторов пренебрегаем, ввиду их малости)

$$X_{*\bar{S}_{тр}} = \frac{U_k \%}{100} * \frac{S_{\bar{S}}}{S_{н.тр}} \quad (3)$$

здесь $X_{*\bar{S}_{тр}}$ - относительное базисное сопротивление трансформатора;

$U_k \%$ - напряжение короткого замыкания трансформатора в %;

$S_{н.тр}$ - номинальная мощность трансформатора в (МВА)

Сопротивление трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов:

$$X_{*бВ} \cong \frac{U_{кВН} \% + U_{кВС} \% - U_{кСН} \%}{200} \cdot \frac{S_б}{S_{н.тр.}} \quad (4)$$

$$X_{*бС} \cong \frac{U_{кВС} \% + U_{кСН} \% - U_{кВН} \%}{200} \cdot \frac{S_б}{S_{н.тр.}} \quad (5)$$

$$X_{*бН} \cong \frac{U_{кВН} \% + U_{кСН} \% - U_{кВС} \%}{200} \cdot \frac{S_б}{S_{н.тр.}} \quad (6)$$

где $X_{*бВ}$, $X_{*бС}$, $X_{*бН}$ - относительные базисные сопротивления, соответственно, обмоток высшего, среднего и низшего сопротивления;

$U_{кВН} \%$ - напряжение короткого замыкания между отмотками высшего и низшего напряжений в (%);

$U_{кВС} \%$ - напряжение короткого замыкания между обмотками высшего и среднего напряжения в (%);

$U_{кСН} \%$ - напряжение короткого замыкания между обмотками среднего и низшего напряжений в (%).

Составляем схему замещения. Преобразуем и упрощаем ее, приводя к точке короткого замыкания. При этом сопротивления, через которые ток трехфазного короткого замыкания не течет, не учитываем.

В результате получаем схему вида:

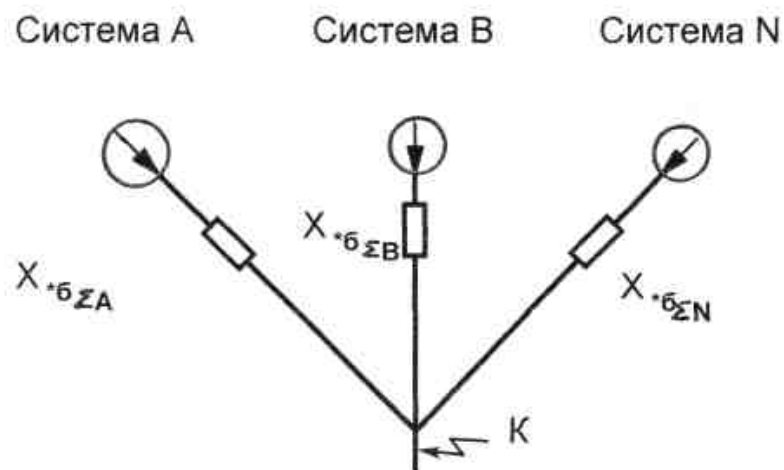


Рис.1.1

Определяем суммарное относительное базисное сопротивление

$$X_{*\Sigma}^{*б} = \frac{1}{\frac{1}{X_{*\Sigma A}^{*б}} + \frac{1}{X_{*\Sigma B}^{*б}} + \frac{1}{X_{*\Sigma N}^{*б}}} \quad (7)$$

Схема замещения примет вид

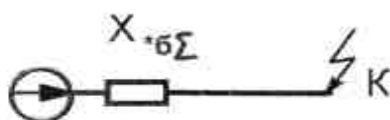


Рис.1.2

Установившийся ток короткого замыкания:

$$I_K^{(3)} = I_\infty^{(3)} = I_{*\infty}^{(3)} \cdot I_б = \frac{U_*}{X_{*\Sigma}^{*б}} \cdot \frac{S_б}{\sqrt{3}U_б} \quad (8)$$

где, $I_\infty^{(3)}$ - установившейся ток трехфазного короткого замыкания в именованных единицах (кА);

$I_{*\infty}^{(3)}$ - установившейся ток трехфазного короткого замыкания в относительных единицах;

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6} - \text{базисный ток};$$

S_6 – базисная мощность в (МВА);

U_6 - базисное напряжение в (кВ);

$$U_6 = U_{\text{ср.н}}$$

где $U_{\text{ср.н}}$ - средне номинальное напряжение ступени КЗ.

U_* - напряжение источника в относительных единицах, можно принять

$$U_* = 1.$$

1.2.1. Определение максимальных значений токов короткого замыкания.

Ударный ток трехфазного короткого замыкания :

$$i_{\text{уд.}}^{(3)} = K_y \cdot \sqrt{2} \cdot I''^{(3)} \quad (9)$$

где, $i_{\text{уд.}}^{(3)}$ - ударный ток трехфазного короткого замыкания.

$I''^{(3)}$ - сверхпереходный ток трехфазного короткого замыкания. В нашем случае можно считать $I''^{(3)} = I_{\infty}^{(3)}$;

K_y - ударный коэффициент (учитывает апериодическую составляющую тока КЗ).

Его значения лежат в пределах от 1 до 2. Если активным сопротивлением пренебрегаем, то можно принять $K_y = 2$.

Наибольшее действующее значение тока трехфазного короткого замыкания:

$$I_y^{(3)} = I''^{(3)} \sqrt{1 + 2(K_y - 1)^2} \quad (10)$$

1.3. Расчет токов двухфазного короткого замыкания.

В общем случае, для определения тока двухфазного короткого замыкания необходимо составить схему замещения обратной последовательности.

При этом, сопротивления обратной последовательности у ЛЭП и трансформаторов такие же, как аналогичные сопротивления прямой последовательности. У вращающихся машин эти сопротивления отличаются друг от друга. Однако, если сопротивления вращающихся машин составляют малую долю в общем сопротивлении, то этим отличием можно пренебречь и считать результирующие сопротивления обратной последовательности равным аналогичному сопротивлению прямой последовательности. В этом случае ток двухфазного короткого замыкания определяется по формуле:

$$I_{\text{к}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{\text{к}}^{(3)} \quad (11)$$

где $I_{\text{к}}^{(3)}$ - ток трехфазного короткого замыкания .

Именно по этой формуле рекомендуется находить величину тока двухфазного короткого замыкания в данной курсовой работе.

1.4. Расчет токов однофазного короткого замыкания.

Для расчета токов однофазного короткого замыкания необходимо составить схему замещения нулевой последовательности. Сопротивления нулевой последовательности, в общем случае отличается от сопротивлений прямой последовательности.

1.4.1. Линии электропередач (ЛЭП)

Для определения сопротивлений нулевой последовательности ЛЭП можно дать следующие рекомендации:

- одноцепные линии без тросов $x_0 = 3.5x_1$
- одноцепные линии со стальным тросом $x_0 = 3.0x_1$
- двухцепные линии без тросов $x_0 = 5.5x_1$
- двухцепные линии со стальным тросом $x_0 = 4.7x_1$
- одноцепные линии с хорошо проводящими тросами $x_0 = 2.0x_1$
- двухцепные линии с хорошо проводящими тросами $x_0 = 3.0x_1$

где x_0 - реактивное сопротивление нулевой последовательности;
 x_1 - реактивное сопротивление прямой последовательности.

1.4.2. Трансформаторы.

Реактивное сопротивление нулевой последовательности трансформаторов зависит от конструкции, схемы соединения обмоток и режима заземления нейтрали.

Со стороны обмотки, соединенной в Δ или Y без заземленной нейтрали, независимо от того, как соединены другие обмотки, реактивное сопротивление нулевой последовательности трансформатора бесконечно велико ($x_0 = \infty$), так как при этих условиях вообще исключена возможность циркуляции тока нулевой последовательности в данном трансформаторе. Следовательно, конечное реактивное сопротивление нулевой последовательности трансформатора может быть только со стороны его обмотки, соединенной в звезду с заземленной нейтралью.

Рассмотрим различные схемы соединения двухобмоточных трансформаторов.

1) Схема соединения Y/Δ

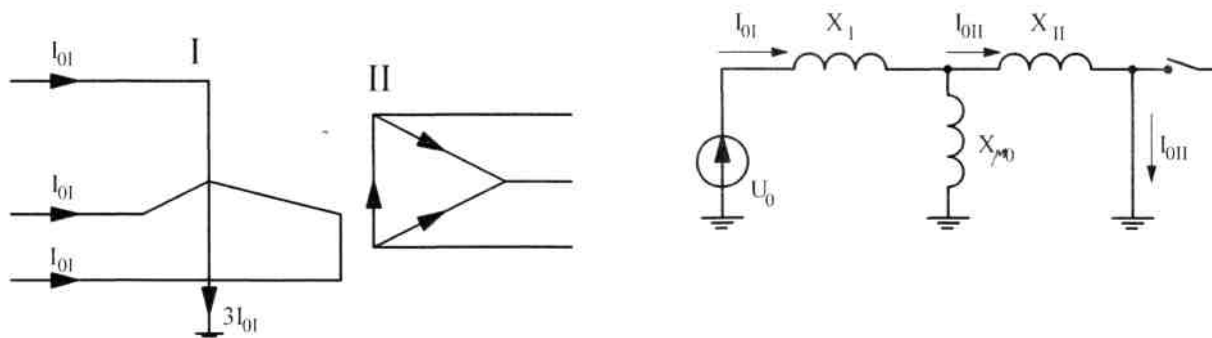


Рис 1.4а

К первичной обмотке приложено напряжение нулевой последовательности. Символ заземления показывает, что данной ветвью схемы замещения

трансформатора заканчивается путь циркуляции токов нулевой последовательности.

Из схемы видно

$$X_0 = X_I + \frac{X_{II} \cdot X_{\mu 0}}{X_{II} + X_{\mu 0}}$$

Обычно $X_{\mu 0} \gg X_{II}$

Поэтому для данного соединения $X_0 = X_I + X_{II} = X_1$

где X_1 - сопротивление прямой последовательности трансформатора.

2) Для схемы Υ/Υ

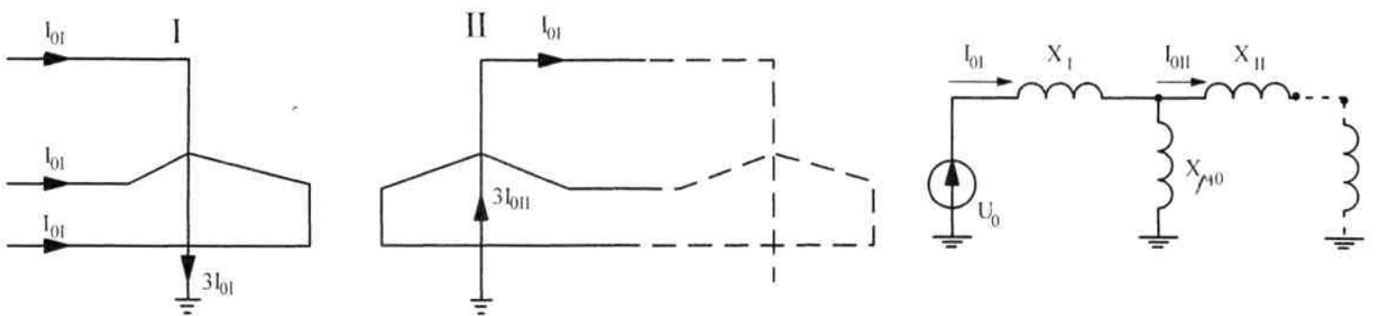


Рис. 1.4б

Предполагая, что в цепи вторичной обмотки трансформатора имеется хотя бы ещё одно заземление нейтрали, отметим, что путь току нулевой последовательности есть на стороне обеих обмоток.

3) Для схемы Υ/Y

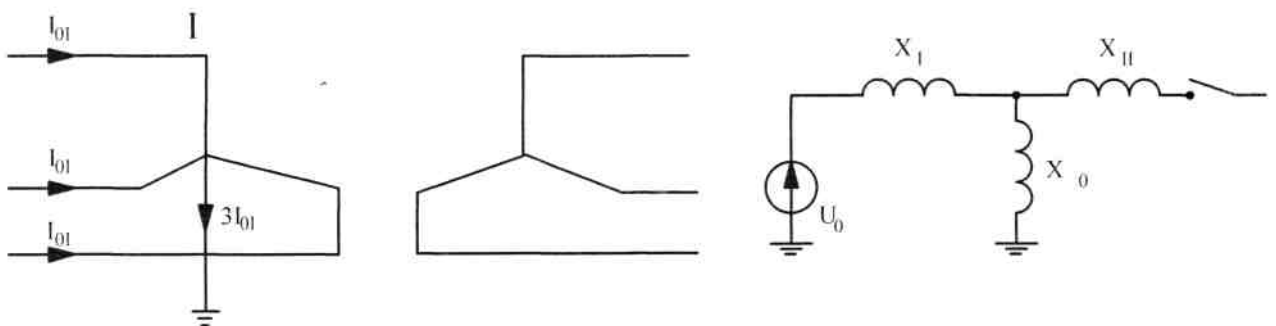


Рис.1.4в

Во вторичной обмотке ток нулевой последовательности протекать не будет (то же будет и при соединении Υ/Υ , $e\Upsilon$ и на стороне вторичной обмотки не будет ни одного заземления нейтрали).

Очевидно, в этом случае

$$X_0 = X_I + X_{\mu 0} \quad \text{т. к. } X_{\mu 0} \gg X_I$$

$$X_0 \cong X_{\mu 0}$$

Для трехфазных трехстержневых трансформаторов можно полагать, что:

$$X_0 = (10 - 20)x_1 \quad \text{ибо у них } X_{\mu 0} = (10 \div 20)x_1$$

Для группы однофазных трансформаторов и трансформаторов бронированного типа $X_{\mu 0} = \infty$ при соединении Υ/Y .

Трехобмоточные трансформаторы.

У трехобмоточных трансформаторов одна обмотка, как правило, соединена в треугольник. Как было показано ранее, треугольник является замкнутым контуром для нулевой последовательности. Эта обмотка как бы шунтирует ветвь намагничивания и поэтому последнюю в схему замещения трехобмоточных трансформаторов можно не вводить (т.е. $X_{\mu 0} = \infty$)

Тогда схемы замещения для трехобмоточных трансформаторов примут вид:

1) Для схемы соединения $\Upsilon/\Delta/Y$

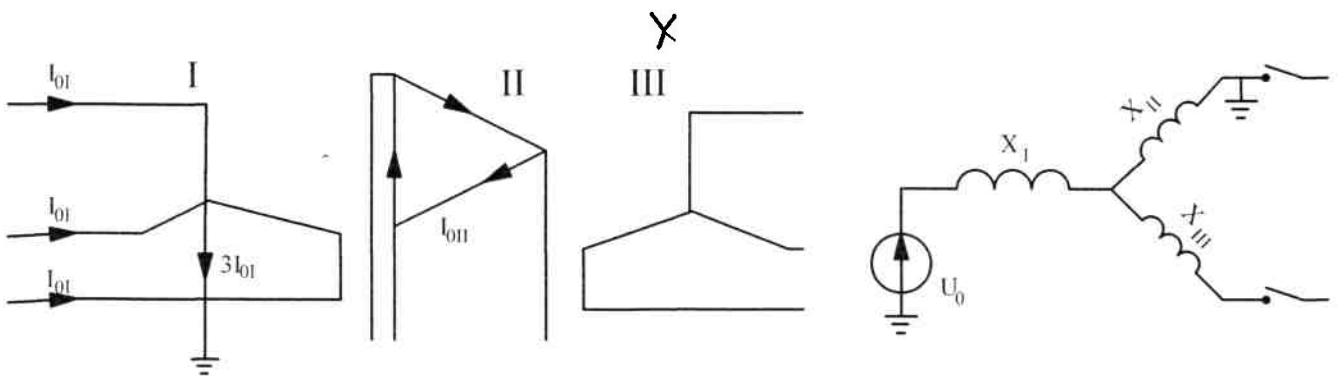


Рис. 4.1г

2) Для схемы $\Upsilon/\Delta/\Upsilon$ при наличии еще хотя бы одного заземления нейтрали в цепи третьей обмотки

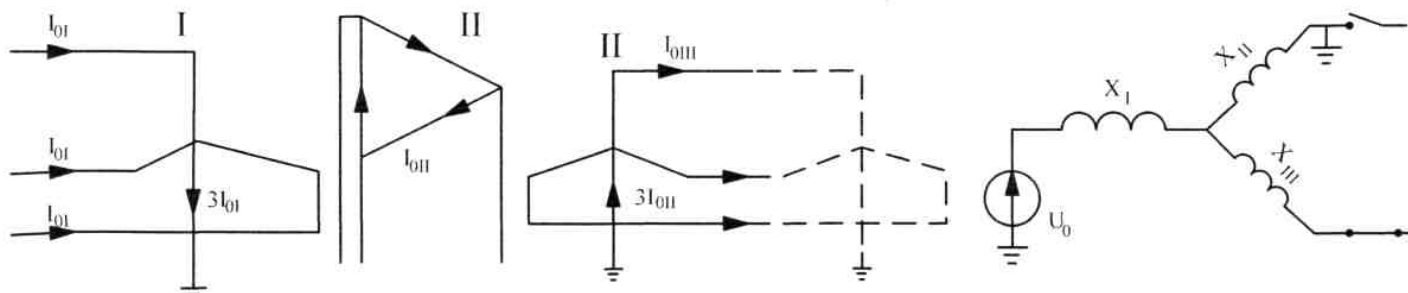
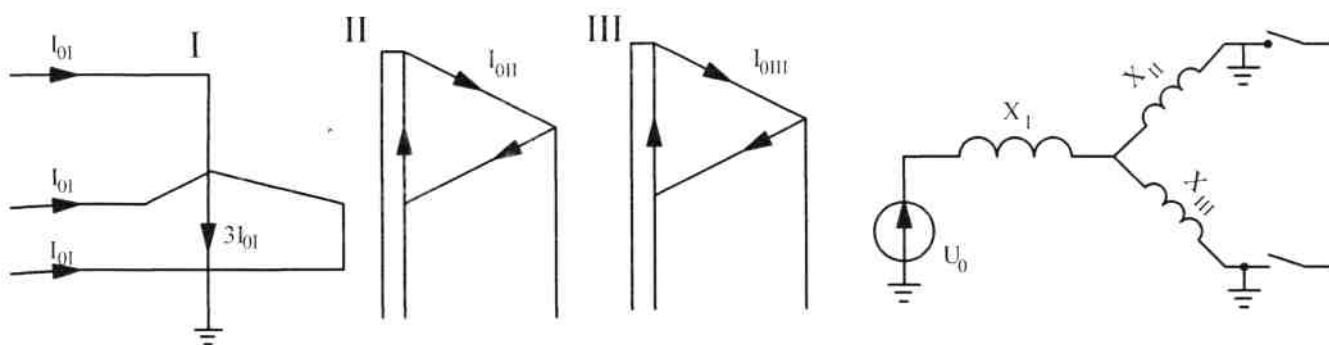


Рис. 4.1д

Таким образом, путь току нулевой последовательности есть во всех трех обмотках. Значение этих сопротивлений определяется по ранее приведенным формулам (4-6) через $U_k\%$.

3) Для схемы $\Upsilon/\Delta/\Delta$

Рис. 4.1е



Таким образом и здесь токи нулевой последовательности проходят по всем обмоткам (хотя и не выходят за пределы 2-й и 3-ей обмоток)

1.4.3. Схему замещения нулевой последовательности преобразуют, упрощают, приводя её к расчетной точке короткого замыкания. В результате находят результирующее сопротивление нулевой последовательности $X_{*б\Sigma 0}$

Суммарное сопротивление цепи для тока однофазного короткого замыкания

$$X_{*б\Sigma} = X_{*б\Sigma 1} + X_{*б\Sigma 2} + X_{*б\Sigma 0} \quad (12)$$

Где $X_{*б_{\Sigma 1}}$ - результирующее сопротивление прямой последовательности;

$X_{*б_{\Sigma 2}}$ – результирующее сопротивление обратной последовательности.

В нашем случае $X_{*б_{\Sigma 2}} = X_{*б_{\Sigma 1}}$

Ток однофазного короткого замыкания

$$I_K^{(1)} = 3 \frac{1}{X_{*б_{\Sigma}}} \cdot \frac{S_б}{\sqrt{3}U_{ср.н}}$$

Где $U_{ср.н}$ - средненоминальное напряжение в расчетной точке КЗ

Пример расчета токов короткого замыкания.

Исходные данные

Расчетная точка КЗ-К1

Мощности автотрансформаторов и трансформаторов					
ТП-1	ТП-2	ТП-3	ТП-4	ТП-5	ТП-6
2×63 МВА	2×32 МВА	2×63 МВА	2×16 МВА	2×10 МВА	2×10 МВА

Сопротивления системы в Омах, приведенные к U=115кВ							
Прямая последовательность				Нулевая последовательность			
A	B	C	D	A	B	C	D
-	5	24	12	-	8	40	10

Данные автотрансформаторов и 3-х обмоточных трансформаторов

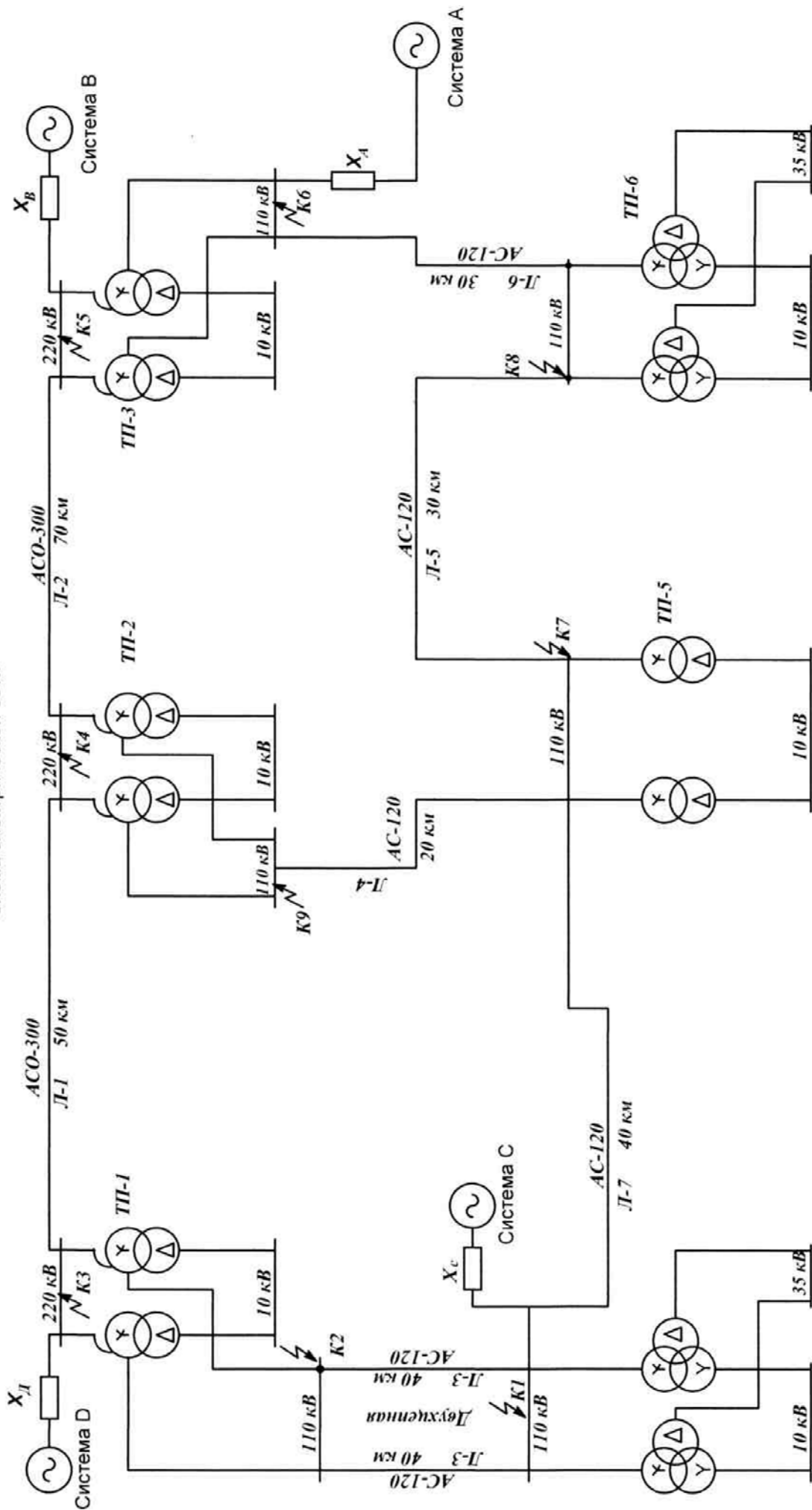
U_H	S_H	U_{KB-C}	U_{KB-M}	U_{KC-M}
В	МВА	%	%	%
20	63	28	18	8
20	32	28	18	8
10	16	17	10,5	6
10	10	17	10,5	6

Для 2-х обмоточных трансформаторов $U_K = 10,5\%$. ВЛ-110 и 220 кВ выполнены с хорошо проводящими тросами. Линия Л-7 отключена.

Нейтрали систем и трансформаторов заземлены наглухо.

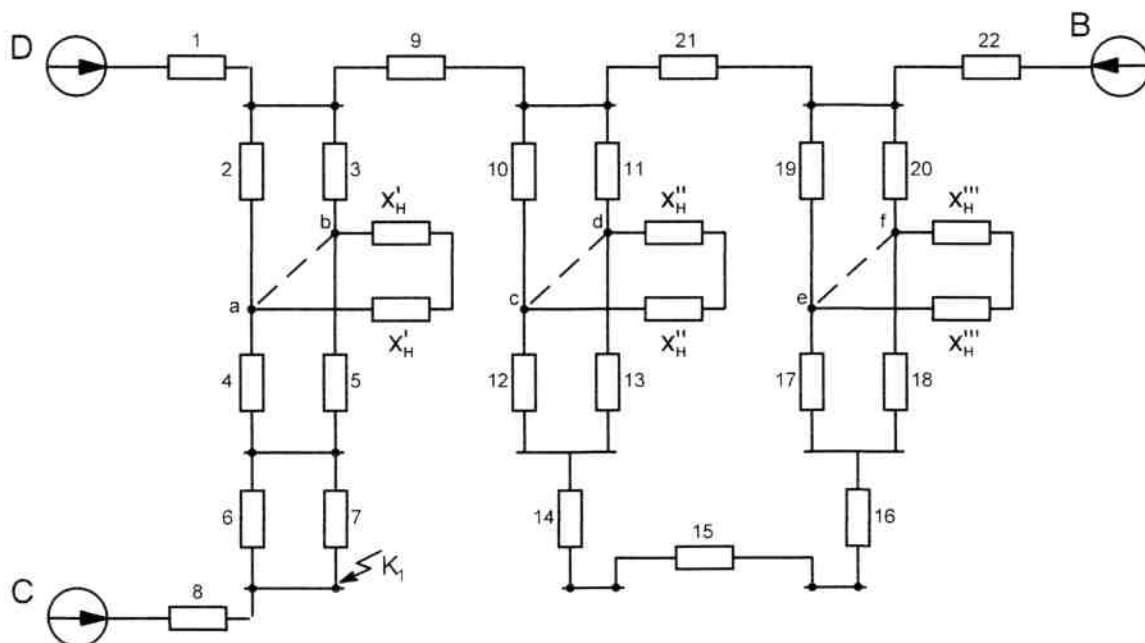
Расчет выполнять по среднономинальным напряжениям

Схема электрической сети



Расчет тока трехфазного короткого замыкания.

Составим схему прямой последовательности:



При расчете пренебрегаем активными составляющими сопротивлений ввиду их малости.

Расчет ведем в относительных базисных единицах, приняв $S_6 = 100$ МВА, $U_{ср.н} = 115$ кВ.

$$X_{*6_1} = X_D \cdot \frac{S_6}{U_{ср.н}^2} = 12 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,091$$

$$X_{*6_2} = X_{*6_3} = \frac{U_{КВН} + U_{КВС} - U_{КНС}}{200} \cdot \frac{S_6}{S_{н.тр}} = \frac{18 + 28 - 8}{200} \cdot \frac{100}{63} = 0,302$$

$$X_{*6_4} = X_{*6_5} = \frac{U_{КВС} + U_{КНС} - U_{КВН}}{200} \cdot \frac{S_6}{S_{н.тр}} = \frac{28 + 8 - 18}{200} \cdot \frac{100}{63} = 0,143$$

$$X_{*6_н} = \frac{U_{КСН} + U_{КВН} - U_{КВС}}{200} \cdot \frac{S_6}{S_{н.тр}} = \frac{8 + 18 - 28}{200} \cdot \frac{100}{63} = -0,016 \approx 0$$

Пренебрегаем сопротивлениями x'_H ввиду их малости, что позволяет закоротить точки а и б (показано пунктиром). В дальнейшем расчете аналогично пренебрежём сопротивлениями x''_H и x'''_H и закоротим точки с-д и е-ф.

$$X_{*6_6} = x_{*6_7} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{ср.н}^2} = 0,4 \cdot 40 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,121$$

$$X_{*6_8} = x_c \cdot \frac{S_6}{U_{ср.н}^2} = 24 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,181$$

$$X_{*6_9} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.н}}^2} = 0.4 \cdot 50 \cdot \frac{100}{230^2} = 0.38$$

$$X_{*6_{10}} = x_{*6_{11}} = \frac{U_{\text{КВН}} + U_{\text{КВС}} - U_{\text{КНС}}}{200} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{н.тр}}} = \frac{18+28-8}{200} \cdot \frac{100}{32} = 0.594$$

$$X_{*6_{12}} = x_{*6_{13}} = \frac{U_{\text{КВС}} + U_{\text{КНС}} - U_{\text{КВН}}}{200} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{н.тр}}} = \frac{28+8-18}{200} \cdot \frac{100}{32} = 0.281$$

$$X_{*6_{\text{н}}} = \frac{U_{\text{КНС}} + U_{\text{КВН}} - U_{\text{КВС}}}{200} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{н.тр}}} = \frac{8+18-28}{200} \cdot \frac{100}{32} = -0,031 \approx 0$$

$$X_{*6_{14}} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.н}}^2} = 0.4 \cdot 30 \cdot \frac{100}{115^2} = 0.06$$

$$X_{*6_{15}} = X_C \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.н}}^2} = 0.4 \cdot 30 \cdot \frac{100}{115^2} = 0.091$$

$$X_{*6_{16}} = X_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.н}}^2} = 0.4 \cdot 30 \cdot \frac{100}{115^2} = 0.091$$

$$X_{*6_{17}} = X_{*6_{18}} = \frac{U_{\text{КВС}} + U_{\text{КНС}} - U_{\text{КВН}}}{200} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{н.тр}}} = 0.143$$

$$X_{*6_{19}} = X_{*6_{20}} = X_{*6_2} = 0.302$$

$$X_{*6_{\text{н}}}''' = X_{*6_{\text{н}}}'' = -0.016 \approx 0$$

$$X_{*6_{21}} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.н}}^2} = 0.4 \cdot 70 \cdot \frac{100}{230^2} = 0.053$$

$$X_{*6_{22}} = x_B \cdot \frac{S_6}{U_{\text{ср.н}}^2} = 5 \cdot \frac{100}{230^2} = 0.038$$

Преобразуем схему замещения.

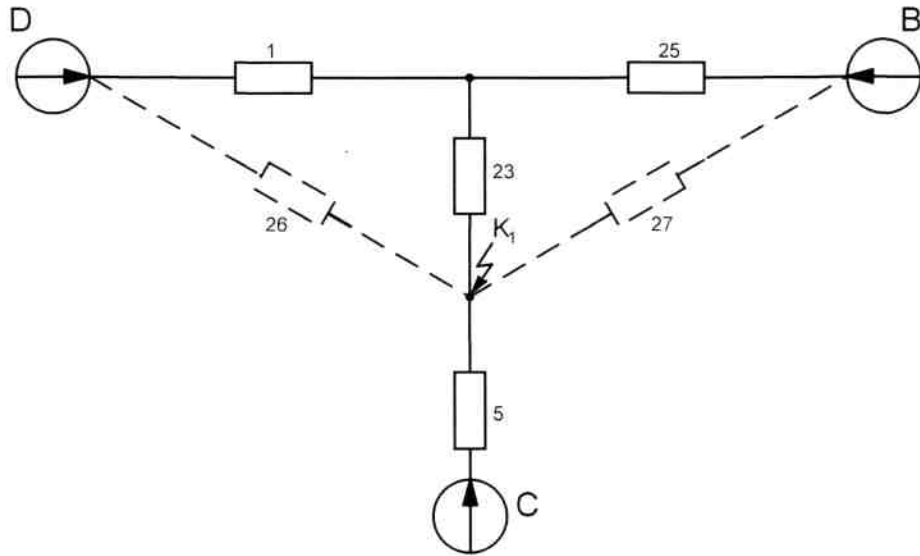
$$X_{*6_{23}} = \frac{X_{*6_2} \cdot X_{*6_3}}{X_{*6_2} + X_{*6_3}} + \frac{X_{*6_4} \cdot X_{*6_5}}{X_{*6_4} + X_{*6_5}} + \frac{X_{*6_6} \cdot X_{*6_7}}{X_{*6_6} + X_{*6_7}} = \frac{0,302}{2} + \frac{0,143}{2} + \frac{0,121}{2} = 0,283$$

$$X_{*6_{24}} = \frac{X_{*6_{10}} \cdot X_{*6_{11}}}{X_{*6_{10}} + X_{*6_{11}}} + \frac{X_{*6_{12}} \cdot X_{*6_{13}}}{X_{*6_{12}} + X_{*6_{13}}} + X_{*6_{14}} + X_{*6_{15}} + X_{*6_{16}} + \frac{X_{*6_{17}} \cdot X_{*6_{18}}}{X_{*6_{17}} + X_{*6_{18}}} +$$

$$+ \frac{X_{*6_{19}} \cdot X_{*6_{20}}}{X_{*6_{19}} + X_{*6_{20}}} = \frac{0,594}{2} + \frac{0,281}{2} + 0,06 + 0,091 + 0,091 + \frac{0,143}{2} + \frac{0,302}{2} = 0,902$$

$$X_{*6_{25}} = X_{*6_9} + \frac{X_{*6_{21}} \cdot X_{*6_{24}}}{X_{*6_{21}} + X_{*6_{24}}} + X_{*6_{22}} = 0,308 + \frac{0,053 \cdot 0,902}{0,053 + 0,902} + 0,038 = 0,126$$

Схема примет вид:

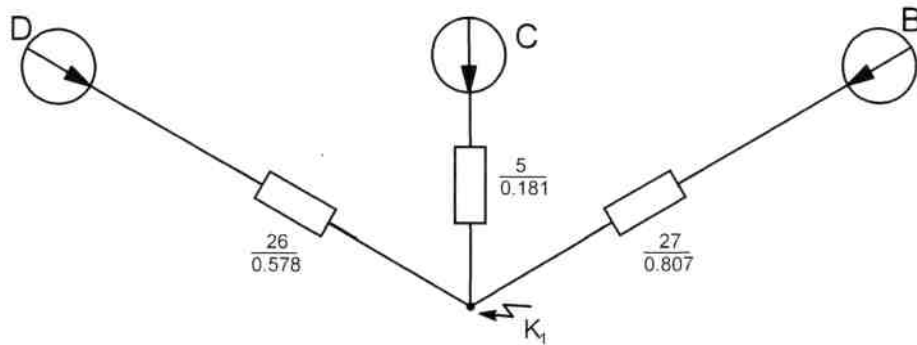


Преобразуем Y сопротивлений 1-23-25 в эквивалентный Δ 26-27 (третья сторона Δ В-D нас не интересует, т.к. по ней ток к.з. не течет).

$$X_{*627} = X_{*623} + X_{*625} + \frac{X_{*623} \cdot X_{*625}}{X_{*61}} = 0.283 + 0.126 + \frac{0.283 \cdot 0.126}{0.091} = 0.801$$

$$X_{*626} = X_{*61} + X_{*623} + \frac{X_{*61} \cdot X_{*623}}{X_{*625}} = 0.091 + 0.283 + \frac{0.091 \cdot 0.283}{0.126} = 0.578$$

Схема замещения примет вид:



Установившееся значение 3-х фазного тока к.з.:

$$I_{\infty} = I_{*\infty} \cdot I_6 = \frac{U_*}{Z_{3*}} \cdot \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6} = \frac{1}{Z_{3*}} \cdot \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6};$$

В нашем случае:

$$I_{\infty} = \frac{1}{Z_{3*}} \cdot \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6}$$

Составляющие тока к.з. от систем:

$$I_D^{(3)} = \frac{1}{X_{*626}} \cdot \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{\text{ср.н.}}} = \frac{1}{0.578} \cdot \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0.869 \text{ кА};$$

$$I_C^{(3)} = \frac{1}{X_{*65}} \cdot \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{\text{ср.н.}}} = \frac{1}{0.181} \cdot \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 2.774 \text{ кА};$$

$$I_B^{(3)} = \frac{1}{X_{*627}} \cdot \frac{S_6}{\sqrt{3}U_{\text{ср.н.}}} = \frac{1}{0.801} \cdot \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0.627 \text{ кА};$$

Суммарный ток от всех систем:

$$I_{k_1}^{(3)} = I_D^{(3)} + I_C^{(3)} + I_B^{(3)} = 0.86 + 2.774 + 0.627 = 4.27 \text{ кА};$$

Этот ток можно определить и так:

Сначала определим суммарное сопротивление

$$x_{*6\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{x_{*626}} + \frac{1}{x_{*65}} + \frac{1}{x_{*627}}} = \frac{1}{\frac{1}{0.578} + \frac{1}{0.181} + \frac{1}{0.801}} = 0.118$$

Тогда ток

$$I_\infty = I_{*\infty} \cdot I_6 = \frac{U_*}{x_{*\Sigma}} \cdot \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6} = \frac{1}{0.118} \cdot \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 4.27 \text{ кА};$$

1.2.1. Определение максимального значения тока трехфазного к.з. ($i_{\text{уд}}^{(3)}$) и наибольшего действующего значения его ($I_{\text{уд}}^{(3)}$).

$$i_{\text{уд}} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I'' \quad \text{и} \quad I_{\text{уд}} = I'' \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2}$$

Если принять $k_y = 2$ (это максимальное значение k_y , когда $R=0$), то получим:

$$i_{\text{уд}}^{(3)} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k_1}^{(3)} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 4.27 = 12.077 \text{ кА};$$

$$I_{\text{уд}}^{(3)} = 4.27 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (2 - 1)^2} = 4.27 \cdot \sqrt{3} = 7.396 \text{ кА}.$$

Определение тока двухфазного к.з. в точке k_1 .

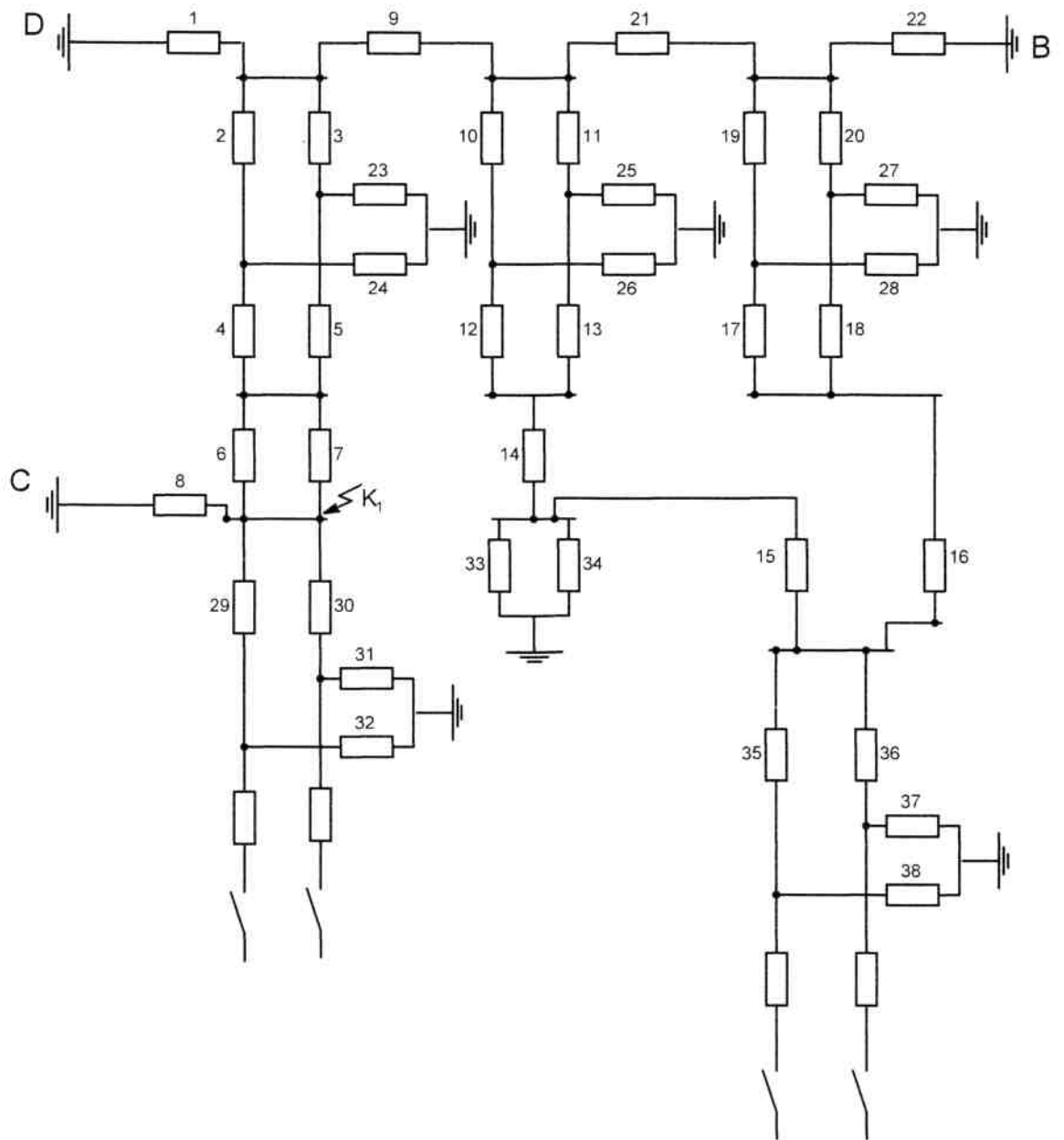
В данном случае сопротивления схемы обратной последовательности равны соответствующим сопротивлениям прямой последовательности.

При этом ток двухфазного к.з. определяется так:

$$U_{k_1}^{(2)} = U_{k_1}^{(3)} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 4.27 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 3.698 \text{ кА}.$$

Определение тока однофазного к.з.

Схема замещения нулевой последовательности.



Определяем сопротивления нулевой последовательности:

$$X_{*б_{01}} = X_{D_0} \cdot \frac{S_6}{U_{ср.н.}^2} = 10 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,076$$

$$X_{*б_{02}} = X_{*б_{03}} = X_{*б_2} = X_{*б_3} = 0.302$$

$$X_{*б_{04}} = X_{*б_{05}} = X_{*б_4} = X_{*б_5} = 0.143$$

$$X_{*б_{023}} = X_{*б_{024}} = X'_{*б_н} = -0.016 \approx 0$$

$$X_{*б_{06}} = X_{*б_{07}} = X_{*б_6} \cdot 3 = 0.121 \cdot 3 = 0.363$$

$$X_{*608} = X_{c0} \cdot \frac{S_6}{U_{cp.H.}^2} = 40 \cdot \frac{110}{115^2} = 0.302$$

$$X_{*6029} = X_{*6030} = \frac{U_{KBH} + U_{KBC} - U_{KHC}}{200} \cdot \frac{S_6}{S_{H.TP}} = \frac{10.5 + 17 - 6}{200} \cdot \frac{100}{16} = 0.672$$

$$X_{*6031} = X_{*6032} = \frac{U_{KBC} + U_{KCH} - U_{KBH}}{200} \cdot \frac{S_6}{S_{H.TP}} = \frac{17 + 6 - 10.5}{200} \cdot \frac{100}{16} = 0.391$$

$$X_{*609} = X_{*69} \cdot 2 = 0.038 \cdot 2 = 0.076$$

$$X_{*6010} = X_{*6011} = X_{*610} = 0.594$$

$$X_{*6012} = X_{*6013} = X_{*612} = 0.281$$

$$X_{*6025} = X_{*6026} = X_{*6H}'' = \frac{U_{KBH} + U_{KBC} - U_{KHC}}{200} \cdot \frac{S_6}{S_{H.TP}} = \frac{18 + 8 - 286}{200} \cdot \frac{100}{32} = -0.031 \approx$$

0

$$X_{*6014} = X_{*614} \cdot 2 = 0.06 \cdot 2 = 0.12$$

$$X_{*6033} = X_{*6034} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_H} = \frac{10.5}{100} \cdot \frac{100}{10} = 1.05$$

$$X_{*6015} = X_{*615} \cdot 2 = 0.091 \cdot 2 = 0.182$$

$$X_{*6035} = X_{*6036} = \frac{U_{KBH} + U_{KBC} - U_{KHC}}{200} \cdot \frac{S_6}{S_{H.TP}} = \frac{10.5 + 17 - 6}{200} \cdot \frac{100}{10} = 1.075$$

$$X_{*6037} = X_{*6038} = \frac{U_{KCH} + U_{KBC} - U_{KBH}}{200} \cdot \frac{S_6}{S_{H.TP}} = \frac{6 + 17 - 10.5}{200} \cdot \frac{100}{10} = 0.625$$

$$X_{*6016} = X_{*616} \cdot 2 = 0.091 \cdot 2 = 0.182$$

$$X_{*6017} = X_{*6018} = X_{*617} = 0.143$$

$$X_{*6019} = X_{*6020} = X_{*619} = 0.302$$

$$X_{*6027} = X_{*6028} = X_{*6H}''' = -0.016 \approx 0$$

$$X_{*6021} = X_{*621} \cdot 2 = 0.053 \cdot 2 = 0.106$$

$$X_{*6022} = X_{B0} \cdot \frac{S_6}{U_{cp.H.}^2} = 8 \cdot \frac{100}{115^2} = 0.06.$$

Преобразуем схему:

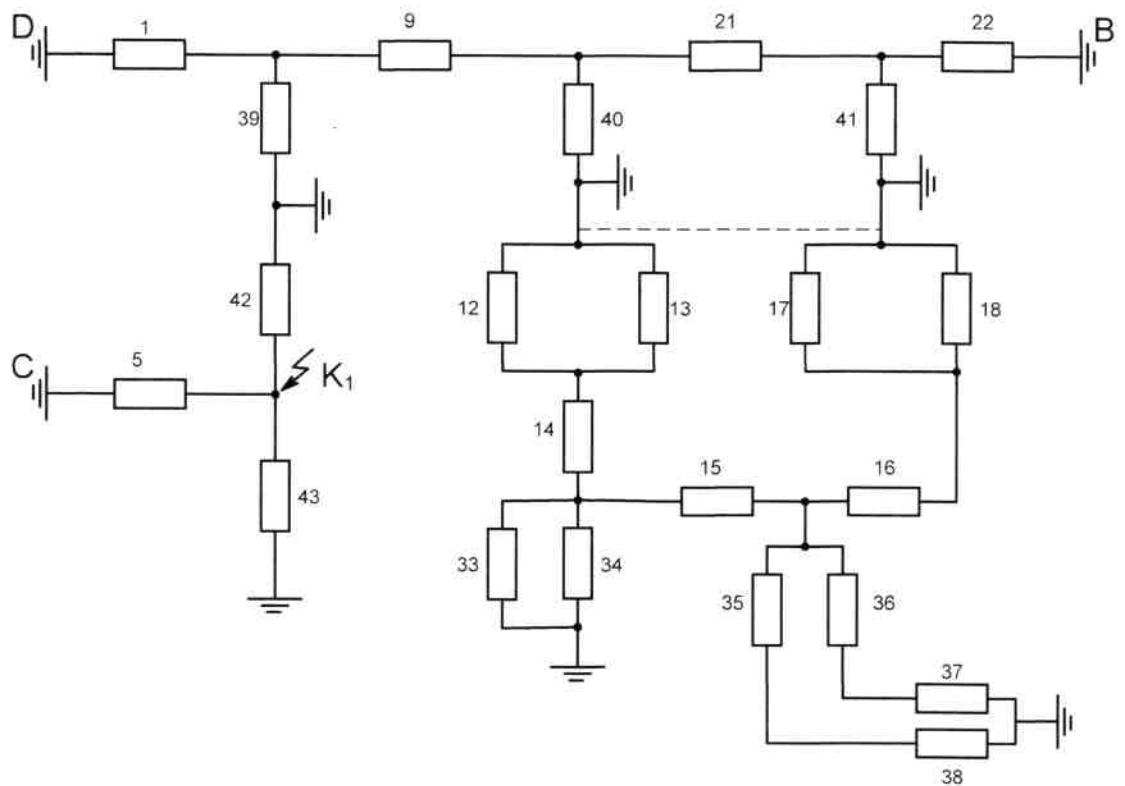
$$X_{*6039} = \frac{X_{*602} \cdot X_{*603}}{X_{*602} + X_{*603}} = \frac{0.302}{2} = 0.151$$

$$X_{*6040} = \frac{X_{*6010} \cdot X_{*6011}}{X_{*6010} + X_{*6011}} = \frac{0.594}{2} = 0.297$$

$$X_{*6041} = \frac{X_{*6019} \cdot X_{*6020}}{X_{*6019} + X_{*6020}} = \frac{0.302}{2} = 0.151$$

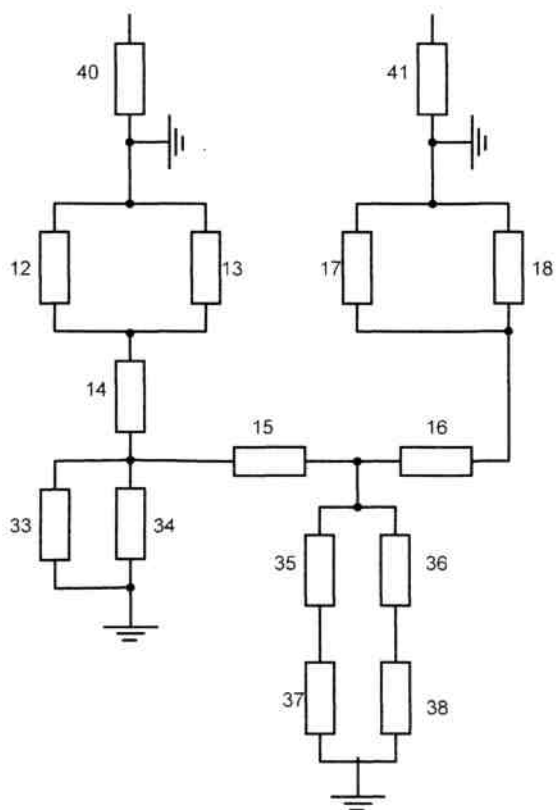
$$X_{*6042} = \frac{X_{*604} \cdot X_{*605}}{X_{*604} + X_{*605}} + \frac{X_{*606} \cdot X_{*607}}{X_{*606} + X_{*607}} = \frac{0.143}{2} + 0.363 = 0.253$$

$$X_{*6043} = \frac{(X_{*6029} + X_{*6032})(X_{*6030} + X_{*6031})}{X_{*6029} + X_{*6032} + X_{*6030} + X_{*6031}} = \frac{(0.672 + 0.391)^2}{(0.672 + 0.391) \cdot 2} = 0.5315$$



Часть схемы, расположенную ниже сопротивлений 40 и 41 можно отбросить, так как она не включает в себя источников питания, точек к.з. и шунтируется перемычкой.

Покажем это более подробно. Выделим часть схемы, лежащую ниже сопротивлений 40 и 41.



Упрощаем схему:

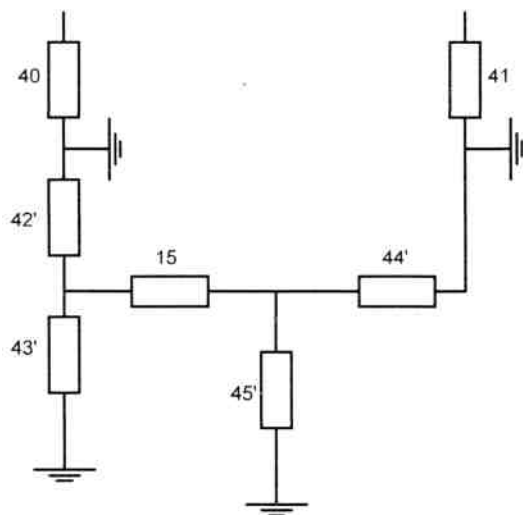
$$X_{42'} = \frac{X_{12} \cdot X_{13}}{X_{12} + X_{13}} + X_{14}$$

$$X_{43'} = \frac{X_{33} \cdot X_{34}}{X_{33} + X_{34}}$$

$$X_{44'} = \frac{X_{17} \cdot X_{18}}{X_{17} + X_{18}} + X_{16}$$

$$X_{45'} = \frac{(X_{35} + X_{37})(X_{36} + X_{38})}{X_{35} + X_{37} + X_{36} + X_{38}} + X_{14}$$

Схема примет вид:



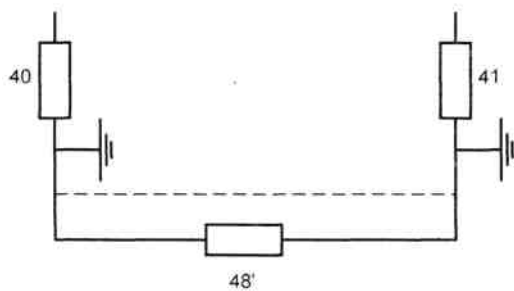
Складываем параллельно включенные сопротивления 42' и 43' , а также 44' и 45'.

$$X_{46'} = \frac{X_{42'} \cdot X_{43'}}{X_{42'} + X_{43'}}$$

$$X_{47'} = \frac{X_{44'} \cdot X_{45'}}{X_{44'} + X_{45'}}$$

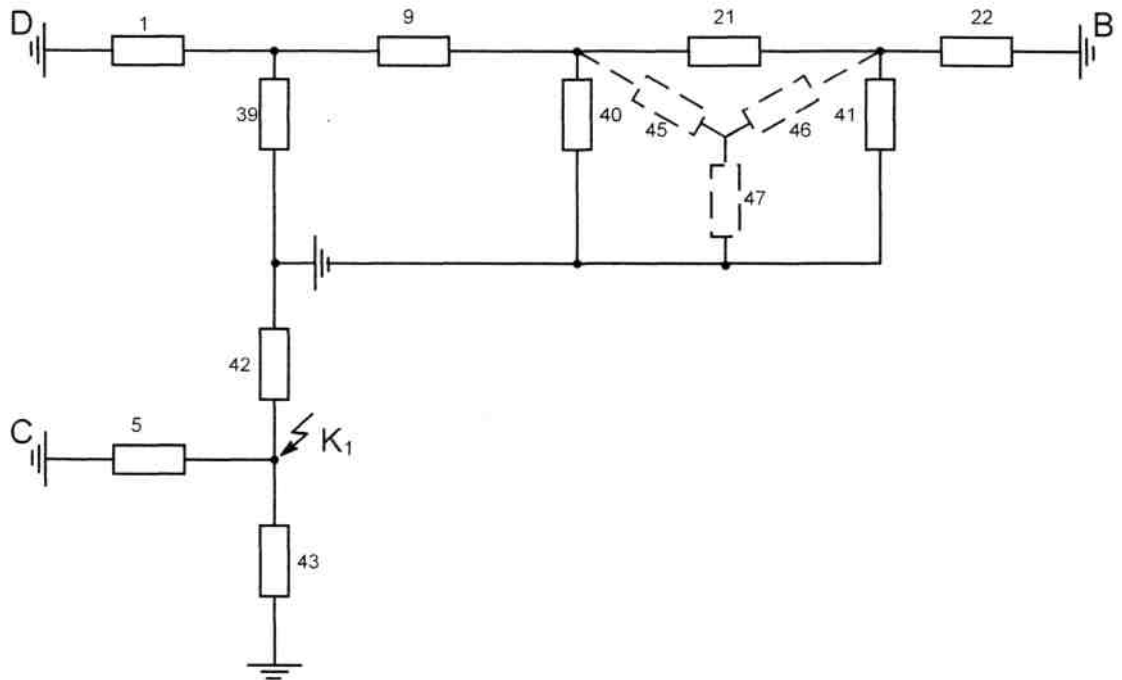


$$X_{48'} = X_{46'} + X_{15} + X_{47'}$$



Сопротивление 48' шунтируется перемычкой. Следовательно, возвращаясь к исходной схеме убирая цепочку сопротивлений, расположенных ниже сопротивлений 40 и 41.

Схема примет вид:



Складываем параллельно включенные сопротивления 42 и 43.

$$X_{*6044} = \frac{X_{*6042} \cdot X_{*6043}}{X_{*6042} + X_{*6043}} = \frac{0,253 \cdot 0,5315}{0,253 + 0,5315} = 0,171$$

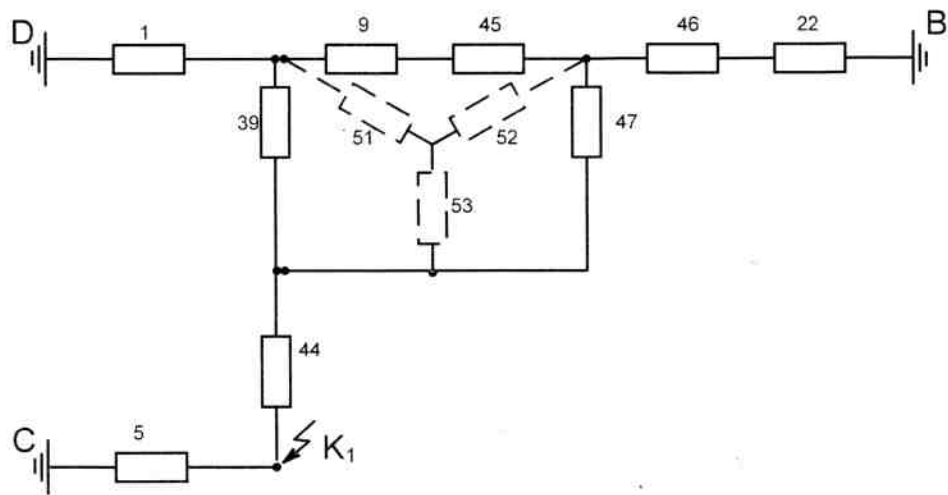
Преобразуем треугольник сопротивлений 40-21-41 в эквивалентную звезду 45-46-47:

$$X_{*6045} = \frac{X_{*6040} \cdot X_{*6021}}{X_{*6040} + X_{*6021} + X_{*6041}} = \frac{0,297 \cdot 0,106}{0,297 + 0,106 + 0,151} = 0,057$$

$$X_{*6046} = \frac{X_{*6021} \cdot X_{*6041}}{X_{*6021} + X_{*6041} + X_{*6040}} = \frac{0,106 \cdot 0,151}{0,106 + 0,151 + 0,297} = 0,029$$

$$X_{*6047} = \frac{X_{*6040} \cdot X_{*6041}}{X_{*6040} + X_{*6041} + X_{*6021}} = \frac{0,297 \cdot 0,151}{0,297 + 0,151 + 0,106} = 0,081$$

Схема примет вид:



$$X_{*б048} = X_{*б045} + X_{*б09} = 0.057 + 0.076 = 0.133$$

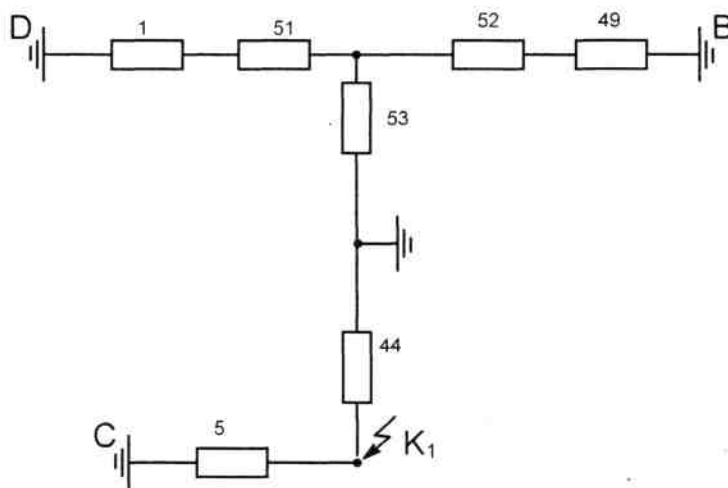
$$X_{*б049} = X_{*б046} + X_{*б022} = 0.029 + 0.06 = 0.089$$

Преобразуем треугольник сопротивлений 39-48-47 в эквивалентную звезду 50-51-52:

$$X_{*б051} = \frac{X_{*б039} \cdot X_{*б048}}{X_{*б039} + X_{*б048} + X_{*б047}} = \frac{0,151 \cdot 0,133}{0,151 + 0,133 + 0,081} = 0.055$$

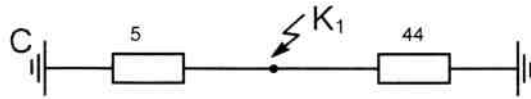
$$X_{*б052} = \frac{X_{*б048} \cdot X_{*б047}}{X_{*б048} + X_{*б047} + X_{*б039}} = \frac{0,133 \cdot 0,081}{0,133 + 0,081 + 0,151} = 0.03$$

Схема примет вид:

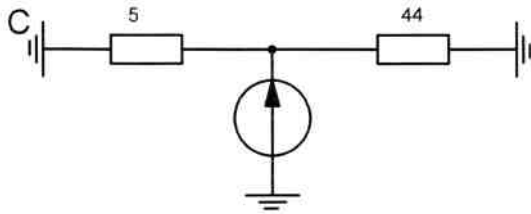


Преобразуя схему, видим, что сопротивления 1, 51, 52, 49, 53 не входят в суммарное сопротивление схемы нулевой последовательности, т.к. между сопротивлениями 53 и 44 имеется заземленный узел.

Следовательно, схема примет вид:



Или

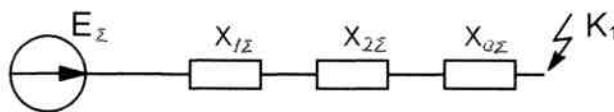


Сопротивления 5 и 44 включены параллельно друг другу. Поэтому результирующее сопротивление нулевой последовательности определяется так:

$$X_{*б_{045}} = \frac{X_{*б_{05}} \cdot X_{*б_{044}}}{X_{*б_{05}} + X_{*б_{044}}} = \frac{0,302 \cdot 0,171}{0,302 + 0,1711} = 0,109$$



Для определения тока однофазного к.з воспользуемся следующей схемой:



Где $X_{1\Sigma}$ – суммарное сопротивление схемы прямой последовательности

$$X_{1\Sigma} = 0,118,$$

$X_{2\Sigma}$ – суммарное сопротивление схемы обратной последовательности. В нашем случае $X_{2\Sigma} = X_{1\Sigma} = 0,118$.

$X_{0\Sigma}$ – суммарное сопротивление схемы нулевой последовательности

$$X_{0\Sigma} = X_{*б_{045}} = 0,109$$

$$X_{\Sigma\text{схемы}} = X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma} = 0,118 + 0,118 + 0,109 = 0,345$$

Ток однофазного короткого замыкания в точке К₁

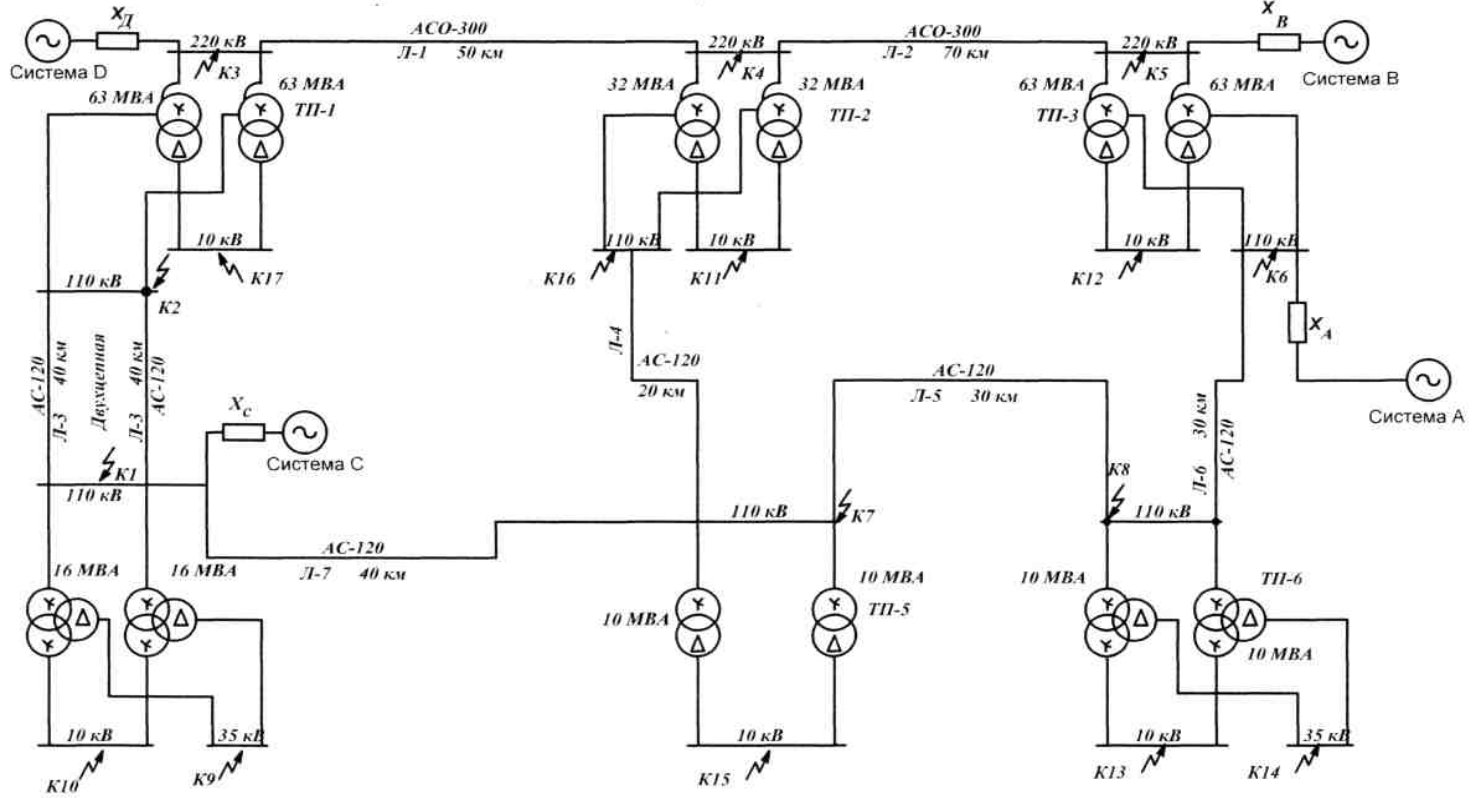
$$I_{K_1}^{(1)} = 3 \cdot \frac{1}{X_{*cx}} \cdot \frac{S_{б}}{\sqrt{3} \cdot U_{cp.n}} = 3 \cdot \frac{1}{0,345} \cdot \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115} = 4,366 \text{ кА.}$$

Список литературы.

1. Крючков И.П., Старшинов В.А., Гусев Ю.П., Пираторов М.В. Переходные процессы в электроэнергетических системах. Учебник для вузов. – М: Издательский дом МЭИ, 2008г.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. – М.: Энергия, 1970.

Расчетно-графическая работа по расчету токов короткого замыкания для студентов 3 курса электроэнергетического факультета по дисциплине «Переходные процессы в электроэнергетических системах».

Схема электрической сети



Данные трансформаторов и автотрансформаторов				
U _н	S _н	U _к в-с	U _к в-н	U _к с-н
кВ	МВА	%	%	%
220	63	8	28	18
220	32	8	28	18
110	16	17	10,5	6
110	10	17	10,5	6

Примечание:

1. Для 2-х обмоточных трансформаторов $U_k = 10,5\%$
2. ВЛ 110/220 кВ выполнены со стальным тросом
3. Расчет выполнит по среднономинальным напряжениям.
4. Нейтрали систем и трансформаторов заземлены наглухо.

Варианты задания к расчетно-графической работе по дисциплине «Переходные процессы в ЭЭС»

№ варианта	Расчетная точка	Сопротивление систем в ОЕ приведенное к U=115 кВ							
		Прямая последовательность				Нулевая последовательность			
		A	B	C	D	A	B	C	D
1, 21	K ₁	4	6	10		5	4	10	
2, 22	K ₁	6		10	4	4		30	4
3, 23	K ₁	8		6	10	7		6	6
4, 24	K ₂	8	4	12		7	6	12	
5, 25	K ₂	10		24	6	10		20	6
6, 26	K ₂	4	12		6	5	6		10
7, 27	K ₃	4	6	8		5	4	8	
8, 28	K ₃	6		10	15	4		30	
9, 29	K ₃	8	3		10	7			6
10, 30	K ₄	8	6	9		7	4		
11, 31	K ₄	10		24	10	10		20	
12, 32	K ₅		5	24	9		8	20	
13, 33	K ₅	8	6		6		4		10
14, 34	K ₅	14		10	8			30	8
15, 35	K ₆	11	8	10			10	30	
16, 36	K ₆	6	4		10		6		6
17, 37	K ₆		16	24	12			20	4
18, 38	K ₇	17	5	24			8	20	
19, 39	K ₇	12	6		6		4		10
20, 40	K ₇	8		10	8			30	8

В ВАРИАНТАХ 1-20 В ИСХОДНОЙ СХЕМЕ ОТКЛЮЧЕНА Л-7, А В ВАРИАНТАХ 21-40 ОТКЛЮЧЕНА Л-5

Для заметок

В авторской редакции

Компьютерная верстка: В.М. Гадышев.

А.В. Каргов